

УДК 629.7.054.07

На правах рукописи

Смирнов Сергей Викторович

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА КОРРЕКЦИИ
ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ
РАДИОТЕЛЕСКОПА**

05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Егоров Юрий Григорьевич

Официальные оппоненты: Костюков Вячеслав Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
МАИ (Технический университет)

Новиков Леонид Захарович,
кандидат физико-математических наук,
Филиал ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ
им. акад. В.И. Кузнецова»

Ведущая организация: ФГУП «НПЦ АП им. акад. Н.А. Пилюгина»,
г. Москва

Защита диссертации состоится 23 мая 2012 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.19.

Автореферат разослан «20» апреля 2012 г.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1997156

Смирнов С.В. Адаптивная сис

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук

 Бурый Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность Современные радиотелескопы предназначены для исследования различных астрономических объектов, проведения астрометрических геодинамических и геофизических наблюдений, слежения за перемещением космических аппаратов, а также координатно-временного обеспечения научной и хозяйственной деятельности.

Непременным требованием современных астрофизических исследований является возможность изучения объекта в разных диапазонах длин волн электромагнитного излучения, поэтому для сопоставления результатов наблюдений необходимо точно определять координаты объекта. Точность определения координат наблюдаемых объектов зависит от углового разрешения радиотелескопа и погрешностей измерения азимута и угла места положения строительной оси антенной системы радиотелескопа относительно Земли. Угловое разрешение определяется длиной волны излучения и размером апертуры антенны и для радиотелескопа миллиметрового диапазона с диаметром параболической антенны 70 м может достигать единиц угловых секунд. Погрешности измерения углового положения антенны в первую очередь зависят от ошибок системы ориентации, которая должна быть включена в состав измерительной подсистемы наземного радиотелескопа и обеспечивать высокую точность угловых измерений при длительном времени функционирования радиотелескопа в условиях движений антенной системы и других внешних воздействий.

Измерение углового положения антенны радиотелескопа относительно опорных геодезических направлений с помощью датчиков углов, расположенных по осям антенной системы, влечет за собой ряд трудностей, связанных с ошибками датчиков, изгибами и кручениями массивных элементов конструкции радиотелескопа и другими факторами.

Наиболее рациональным представляется вариант построения инерциальной системы ориентации (ИСО) на базе трехосного гиросtabilизатора (ТГС), который размещается на горизонтальной оси радиотелескопа. В этом случае информация о действительном угловом положении антенной системы радиотелескопа снимается непосредственно с датчиков углов, расположенных на осях карданова подвеса гиropлатформы ТГС ИСО. Таким образом, гиropлатформа является хранителем опорных направлений, относительно которых определяется ориентация антенной системы радиотелескопа. Следует отметить, что в настоящей работе не рассматриваются отдельные сложные научно-технические задачи, связанные с передачей опорных направлений от ИСО к оси радиотелескопа, в том числе в условиях деформации элементов конструкции параболической антенны диаметром более 10 метров под действием собственного веса или ветровых нагрузок.

Известно, что в процессе работы ТГС накапливается ошибка определения азимутального положения гиropлатформы, поэтому необходимо периодическое проведение режима азимутального ориентирования. Одним из особых требований, предъявляемых к системе ориентации радиотелескопа, является высокая точность угловых измерений при продолжительном (до 12 часов) времени не-

прерывной работы радиотелескопа в режиме измерений. Поэтому актуальной и важной является проблема исследования возможности создания прецизионной непрерывно функционирующей системы коррекции азимутальной ошибки ТГС ИСО радиотелескопа и доказательство ее технической реализуемости.

Требование обеспечения непрерывности режима измерения углов при работе системы коррекции обеспечивается за счет принудительного вращения гироскопа вокруг вертикальной оси. Теоретические основы указанного подхода были заложены в работах Быковского А.В., Величко М.А., Егорова Ю.Г., Петрова А.В., Салычева О.С., Селивановой Л.М., Харламова С.А. и других.

Целью диссертационной работы является разработка адаптивной системы коррекции ошибки азимутального ориентирования гироскопа и идентификации инструментальных погрешностей ТГС ИСО радиотелескопа.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Синтезирована математическая модель адаптивной системы коррекции (АСК), устанавливающая связь между невязками действительных и модельных значений сигналов в каналах горизонтального приведения гироскопа с ошибкой азимутального ориентирования и инструментальными погрешностями ТГС при непрерывном азимутальном вращении гироскопа.

2. Изучена наблюдаемость ошибок ориентирования гироскопа и инструментальных погрешностей ТГС при постоянной и переменной угловых скоростях вращающегося гироскопа вокруг вертикальной оси.

3. Теоретически исследованы ошибки оценивания параметров АСК, определен рациональный состав вектора состояния и осуществлена декомпозиция задачи оценивания на основе полученных аналитических зависимостей, описывающих сходимость относительных ошибок оценивания параметров АСК с интегрированным и раздельным учетом скорости изменения ошибки азимутального ориентирования гироскопа.

4. Разработаны алгоритмы идентификации и настройки параметров АСК с обменом информацией об ошибке азимутального ориентирования гироскопа между измерительными каналами, а также обоснована целесообразность организации двухступенчатой схемы обработки информации в АСК.

5. С целью проверки работоспособности разработанных алгоритмов и оценивания достижимых точностных характеристик проведено моделирование алгоритмов работы АСК с использованием результатов исследования характеристик экспериментально зарегистрированных сигналов в каналах горизонтального приведения гироскопа ТГС.

Методы исследования базируются на теории гиросtabilизаторов, теории инерциальных навигационных систем, теории динамических систем, теории оценивания, теории случайных процессов и математической статистики, численных методах математического моделирования.

Достоверность результатов и выводов, сформулированных в работе, обоснована учетом в предложенных и используемых математических моделях основных принципов работы трехосного гиросtabilизатора, применением правдоподобных допущений и подтверждена проверкой работоспособности синтезиро-

ванных алгоритмов с использованием экспериментально зарегистрированных характеристик сигналов в каналах горизонтального приведения гироскопов.

Научная новизна:

1. Синтезирована математическая модель АСК в пространстве состояний, учитывающая ошибки ориентации гироскопов, ошибки выставки и инструментальные погрешности гироскопов и акселерометров, ошибки в каналах горизонтального приведения и командной прецессии гироскопов.

2. Исследована наблюдаемость ошибки азимутального ориентирования и инструментальных погрешностей ТГС ИСО при постоянной и переменной угловых скоростях вращения гироскопов вокруг вертикальной оси в процессе работы АСК.

3. Получены аналитические выражения, описывающие сходимость относительных ошибок оценивания параметров АСК с интегрированным и отдельным учетом скорости изменения ошибки азимутального ориентирования гироскопов, на основе анализа которых определен рациональный состав оцениваемых параметров АСК и проведена декомпозиция задачи оценивания.

4. Показана целесообразность применения синтезированных алгоритмов работы АСК для оценивания азимутальной ошибки и идентификации инструментальных погрешностей при непрерывном азимутальном вращении гироскопов в течение длительного времени работы ИСО радиотелескопа.

Практическая ценность работы заключается в использовании полученных результатов при создании высокоточной ИСО радиотелескопа «РТ-70» международной радиоастрономической обсерватории на высокогорном плато Суффа в Зааминском районе Джизакской области Узбекистана. Синтезированная математическая модель АСК и результаты исследований позволили разработать алгоритмы оценивания и настройки параметров АСК, применение которых исключает увеличение с течением времени ошибок измерения углов с помощью ИСО на базе ТГС при длительной работе радиотелескопа.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Синтезированная математическая модель АСК связывает невязки действительных и модельных значений сигналов в каналах горизонтального приведения с ошибкой азимутального ориентирования гироскопов и инструментальными погрешностями ТГС.

2. Показано, что ошибка азимутального ориентирования гироскопов и инструментальные погрешности ТГС наблюдаемы как при постоянной, так и при переменной угловой скорости вращения гироскопов вокруг вертикальной оси.

3. По результатам проведенного аналитического исследования сходимости относительных ошибок оценивания параметров АСК определен рациональный состав идентифицируемых параметров и проведена декомпозиция задачи оценивания.

4. Экспериментально подтверждены адекватность разработанной математической модели и техническая реализуемость разработанных алгоритмов АСК. Установлено, что при скоростях вращения гироскопов порядка $100 \text{ град}\cdot\text{ч}^{-1}$

ошибка азимутального ориентирования в процессе работы АСК уменьшается в десятки раз за один оборот гиросплатформы.

Апробация работы Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XIV, XV, XVI и XVII Международных конференциях по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, ЦНИИ «Электроприбор», 2007-2010 гг.); на XXV конференции памяти Н.Н.Острякова (г. Санкт-Петербург, ЦНИИ «Электроприбор», 2006 г.); на I и III конференциях молодых ученых московского отделения Академии навигации и управления движением (г. Москва, ФГУП «ЦНИИАГ», 2008 и 2010 гг.); на XXXI, XXXII и XXXIII Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева (г. Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007-2009 гг.).

Реализация и внедрение результатов.

Результаты диссертационной работы внедрены Астрокосмическим центром Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН) при разработке ИСО радиотелескопа РТ-70, что подтверждено соответствующим актом.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 7 работах, в том числе 3 статьи опубликованы в журналах, входящих в Перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 127 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, который включает 105 библиографических ссылок, и приложения. Работа содержит 35 рисунков и 5 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, показаны её научная новизна и практическая значимость, а также раскрыто содержание глав диссертации.

В первой главе описан принцип построения ИСО на базе ТГС и приведена функционально-кинематическая схема ТГС. Вариант построения ИСО на базе ТГС позволяет физически моделировать угловое положение гиросплатформы и получать информацию об угле места и азимуте непосредственно от датчиков углов, расположенных на осях карданова подвеса гиросплатформы. При создании ИСО радиотелескопа по предложенному варианту целесообразно использовать существующий опыт разработки ТГС высокоточных инерциальных навигационных систем (ИНС), взяв за основу прибор, снабженный программно-математическим обеспечением, реализующим алгоритмы системы коррекции.

Акселерометры, применяемые в качестве чувствительных элементов (ЧЭ) системы приведения, имеют достаточную точность для приведения гиросплатформы в плоскость горизонта с минимальными ошибками. Однако ошибка определения азимутального положения гиросплатформы увеличивается с течением времени и за продолжительное время непрерывной работы радиотелескопа в режиме измерений может превысить допустимую величину. Поэтому необходимо использовать методы автономного азимутального ориентирования, позво-

ляющие реализовать коррекцию ИСО без перерывов в работе радиотелескопа. Для этого требуется создание непрерывно функционирующей системы азимутального ориентирования и идентификации параметров ТГС ИСО.

С целью непрерывного высокоточного определения углов ориентации антенной системы радиотелескопа предлагается использовать систему коррекции ИСО, позволяющую оценивать ошибку азимутального ориентирования гироскопа и идентифицировать инструментальные погрешности ТГС непосредственно в режиме измерений углов. В данной системе коррекции измерение сигналов в каналах горизонтального приведения гироскопа происходит постоянно в процессе работы ИСО, а вращение гироскопа по азимуту осуществляется путем подачи управляющих сигналов на азимутальный гироскоп в режиме точного приведения ТГС. Съем информации об угловом положении гироскопа осуществляется в реальном масштабе времени с датчиков углов по осям карданового подвеса. При этом горизонтальные оси гироскопа в процессе вращения находятся в плоскости горизонта и непрерывно изменяют свое положение относительно северного направления. Такое движение гироскопа обеспечивает наблюдаемость ошибки азимутального ориентирования гироскопа и идентифицируемость инструментальных погрешностей ТГС ИСО, что в свою очередь позволяет получать оценки данных параметров в реальном масштабе времени по информации двух измерительных каналов с использованием алгоритмов оптимального оценивания и идентификации динамических систем.

Наиболее предпочтительным вариантом представляется реализация данной системы путем построения адаптивной системы автономной азимутальной коррекции (АСК) и идентификации погрешностей ТГС ИСО с использованием настраиваемых моделей (НМ). В этом случае обеспечивается замкнутость системы коррекции как по управлению, так и по идентифицируемым параметрам, а также работа в области малых отклонений и, как следствие, высокая устойчивость и быстрая сходимости алгоритмов оценивания и идентификации.

На рис. 1 представлена функциональная схема АСК ИСО. В блоке ТГС ИСО выделены чувствительные элементы – гироскопы и акселерометры. Система горизонтального приведения гироскопа ТГС ИСО работает по алгоритмам, реализованным в блоке алгоритмов горизонтального приведения (БАП). Входными сигналами для БАП являются выходные сигналы акселерометров горизонтальных каналов, по которым в соответствии с алгоритмами горизонтального приведения вырабатываются управляющие сигналы для гироскопов соответствующих каналов системы стабилизации гироскопа.

ТГС ИСО и БАП отображают на схеме функциональные связи в трехосном гироскопическом устройстве, необходимые для описания устройства и алгоритмов работы АСК ИСО по сигналам в каналах горизонтального приведения гироскопа. Остальные функциональные блоки АСК ИСО, представленные на схеме, могут быть реализованы алгоритмически в цифровом вычислительном комплексе с использованием необходимых устройств согласования и преобразования информации.

НМ ТГС ИСО описывает работу ТГС ИСО в режиме приведения по горизонтальным каналам и командной прецессии по азимутальному каналу. НМ БАП моделирует работу системы горизонтального приведения гиросплатформы. В указанных блоках используются значения переменных состояния и идентифицируемых параметров ТГС ИСО, известных к данному моменту времени в результате работы АСК.

В блоке управления (БУ) в соответствии с законом управления $\alpha_k(t)$ и текущими оценками ошибок ориентации гиросплатформы формируется управляющий сигнал командной прецессии гиросплатформы.

Блок сравнения (БС) обеспечивает вычисление невязки действительных сигналов системы горизонтального приведения гиросплатформы и их модельных значений. В результате на выходе БС в каждый момент времени формируются невязки данных сигналов, которые несут всю необходимую информацию об ошибках ориентации гиросплатформы и идентифицируемых параметрах ТГС ИСО.

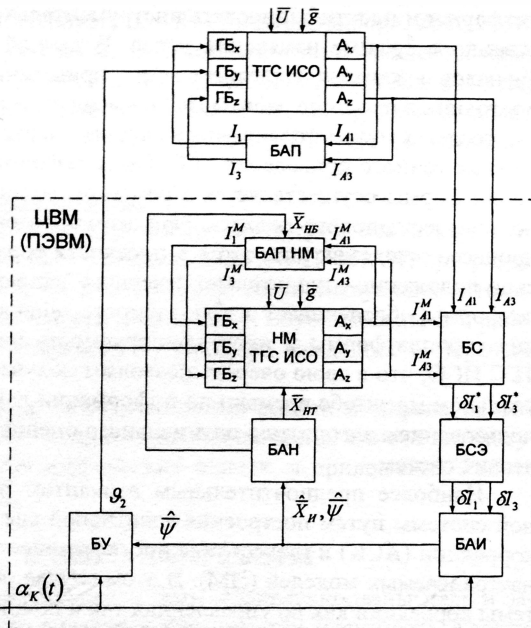


Рис. 1. Функциональная схема АСК ИСО

В блоке сглаживания и экстраполяции (БСЭ) производится предварительная обработка невязок действительных и модельных значений сигналов с целью уменьшения влияния шумов измерений путем сглаживания и экстраполяции данных на конец текущего такта работы алгоритмов идентификации АСК. Блок алгоритмов идентификации (БАИ) вырабатывает на каждом такте времени оценки ошибки ориентации гиросплатформы и идентифицируемых инструментальных погрешностей ТГС ИСО с использованием алгоритмов оптимального оценивания и идентификации. Блок алгоритмов настройки (БАН) производит подстройку параметров НМ ТГС ИСО и НМ БАП в соответствии с полученными к текущему моменту времени оценками азимутальной ошибки ориентации гиросплатформы и инструментальных погрешностей ТГС ИСО.

Таким образом, в целом АСК ИСО является сложной высокоразмерной автономной автоматической интегрированной динамической системой с взаимосвязанными измерительными каналами, и замкнутыми контурами управления, идентификации и настройки параметров.

Выполнен синтез математической модели АСК в пространстве состояний с использованием уравнений движения гиросплатформы ТГС в режиме приведения относительно горизонтальных осей по сигналам акселерометров и стабилизации с командной прецессией относительно вертикальной оси. Модель движения гиросплатформы получена на основе уравнений прецессионного движения ТГС, в которых учтены ошибки ориентации гиросплатформы, ошибки выставки и инструментальные погрешности гироблоков и акселерометров, ошибки в каналах горизонтального приведения и командной прецессии гиросплатформы.

С целью корректного учета указанных ошибок потребовалось ввести 6 систем координат (СК): 1 - географическая, 2 - модельная, 3 - приборная, 4 - связанная с входными осями гироблоков, 5 - связанная с входными осями акселерометров, 6 - опорная СК.

На рис. 2 представлен граф взаимосвязи систем координат и обозначены соответствующие матрицы перехода.

В результате получены уравнения углового движения гиросплатформы, связывающие действительные значения сигналов в каналах горизонтального приведения ϑ_1 , ϑ_3 и командной прецессии гиросплатформы вокруг вертикальной оси ϑ_2 с инструментальными погрешностями ТГС и ошибками ориентирования гиросплатформы:

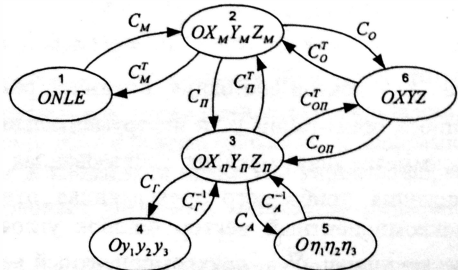


Рис. 2. Граф взаимосвязи систем координат

$$\begin{cases} \vartheta_1 = (1 - \delta k_1) U_N \cos(A + \Omega t + \psi_y) + (\gamma_1^3 - \chi_1^3 + \psi_z)(\Omega + U_L) - \\ \quad - \gamma_1^2 U_N \sin(A + \Omega t + \psi_y) - \omega_{d1}, \\ \vartheta_2 = (1 - \delta k_2)(\Omega + U_L) - (\gamma_2^3 - \chi_2^3 + \psi_z) U_N \cos(A + \Omega t + \psi_y) + \\ \quad + (\gamma_2^1 - \chi_2^1 + \psi_x) U_N \sin(A + \Omega t + \psi_y) - \omega_{d2}, \\ \vartheta_3 = (1 - \delta k_3) U_N \sin(A + \Omega t + \psi_y) + \gamma_3^2 U_N \cos(A + \Omega t + \psi_y) - \\ \quad - (\gamma_3^1 - \chi_3^1 + \psi_x)(\Omega + U_L) - \omega_{d3}, \end{cases} \quad (1)$$

где: ψ_y - ошибка азимутального ориентирования гиросплатформы; ψ_x , ψ_z - ошибки ориентирования гиросплатформы относительно плоскости горизонта; δk_1 , δk_2 , δk_3 - относительные ошибки в коэффициентах передачи каналов командной прецессии по угловой скорости; ω_{d1} , ω_{d2} , ω_{d3} - дрейфы гироблоков; γ_j^i - углы выставки входных осей гироблоков относительно приборной СК; χ_j^i - углы выставки входных осей акселерометров относительно приборной СК; A - угол первоначальной азимутальной выставки гиросплатформы; Ω - угловая скорость вращения гиросплатформы относительно Земли вокруг верти-

кальной оси; U_N, U_L – северная и вертикальная составляющие угловой скорости суточного вращения Земли; t – время.

Очевидно, что каждое из уравнений (1) может быть представлено суммой модельного значения и ошибкой (отклонением) в соответствующем канале приведения или командной прецессии. Тогда, пренебрегая членами второго порядка малости, можно получить уравнения, связывающие ошибки в токах горизонтальных каналов $\delta I_1, \delta I_3$ с ошибками ориентирования гиросплатформы и инструментальными погрешностями ТГС. Синтезированная таким образом с использованием уравнения Пуассона и выражений (1) математическая модель АСК ИСО в пространстве состояний имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{\bar{\psi}} = A_{\psi} \bar{\psi} + \delta \bar{\mathcal{G}}, \\ \dot{\bar{\mathcal{I}}} = H(A, \Omega, t) \bar{X} + \bar{w}, \end{cases} \quad (2)$$

где: $\bar{X}$ – вектор состояния, имеющий размерность 15 и включающий вектора ошибок ориентации $\bar{\psi}$ и инструментальных погрешностей ТГС $\bar{X}_H$; A_{ψ} – кососимметричная матрица, образованная составляющими угловой скорости движения приборного трехгранника относительно географического; $\delta \bar{\mathcal{G}}$ – трехкомпонентный вектор ошибок угловой скорости движения приборного трехгранника; $\bar{\mathcal{I}}$ – двухкомпонентный вектор отклонений сигналов в каналах горизонтального приведения от расчетных значений в процессе вращения гиросплатформы в азимуте; $H(A, \Omega, t)$ – нестационарная матрица измерений, имеющая размерность 2×15 и зависящая от первоначальной азимутальной выставки A , закона управления движением гиросплатформы вокруг вертикальной оси $\Omega(t) = \mathcal{I}_2(t) - U_L$ и текущего времени t ; $\bar{w}$ – вектор шумов измерений.

Поскольку угловая скорость командной прецессии вокруг вертикали намного больше угловых скоростей приведения гиросплатформы в плоскость горизонта, ошибки в каналах горизонтального приведения составляют единицы угловых секунд, а ошибку азимутального ориентирования с точностью до величин второго порядка малости допустимо представить в виде линейно зависящей от времени функции, то математическую модель АСК в пространстве состояний (2) можно записать в компактном скалярном виде:

$$\begin{cases} \psi_y(t) = \psi_o + \psi_1 t, \\ \delta I_1 = -\psi_y U_N \sin(A + \Omega t) - \delta k_1 U_N \cos(A + \Omega t) + \omega_1 + w_1, \\ \delta I_3 = (\psi_y + \gamma_{13}) U_N \cos(A + \Omega t) - \delta k_3 U_N \sin(A + \Omega t) + \omega_3 + w_3, \end{cases} \quad (3)$$

где $\psi_1 = \omega_{a2} + \delta k_2 \mathcal{I}_2$ – скорость изменения ошибки азимутального ориентирования ψ_y . За начало отсчета азимутального угла гиросплатформы принято положение входной оси первого гироскопа, поэтому введено обозначение угла между входными осями первого и третьего гироскопа в плоскости $X_H Z_H$ гиросплатформы $\gamma_{13} = \gamma_3^2 - \gamma_1^2$. Также введены новые параметры, характеризующие

обобщенные дрейфы гиросплатформы вокруг соответствующих горизонтальных осей: $\omega_1 = (\gamma_1^3 - \chi_1^3 + \psi_z)(\Omega + U_L) - \omega_{d1}$; $\omega_3 = -(\gamma_3^1 - \chi_3^1 + \psi_x)(\Omega + U_L) - \omega_{d3}$.

Полученные в векторно-матричном (2) и скалярном виде (3) уравнения состояния и измерений являются основой для дальнейших исследований и синтеза алгоритмов АСК.

Во второй главе приведены результаты исследования наблюдаемости ошибки азимутального ориентирования и идентифицируемости инструментальных погрешностей ТГС, проанализирована точность оценивания компонент векторов состояний различного состава и осуществлена декомпозиция задачи оценивания в АСК.

Проведен анализ наблюдаемости ошибки азимутального ориентирования и инструментальных погрешностей ТГС в АСК. В таблице 1 показаны результаты исследования наблюдаемости параметров АСК. Видно, что ошибка азимутального ориентирования гиросплатформы ψ_y наблюдаема полностью (отмечена знаком “плюс”), а остальные параметры или также полностью наблюдаемы, или наблюдаемы в линейной комбинации друг с другом (обозначены цифрами). Установлено, что переменная скорость командной прецессии гиросплатформы вокруг вертикальной оси $\mathcal{Q}_2(t)$ позволяет увеличить количество отдельно наблюдаемых параметров.

Результаты исследования наблюдаемости, представленные в таблице 1, подтверждают возможность построения прецизионного алгоритма азимутального ориентирования на основе полученной математической модели АСК (2).

Таблица 1. Результаты исследования наблюдаемости параметров АСК

Закон управления $\mathcal{Q}_2(t)$	Параметр													
	ψ_x	ψ_y	ψ_z	γ_{13}	γ_1^3	γ_3^1	χ_1^3	χ_3^1	$\delta\kappa_1$	$\delta\kappa_2$	$\delta\kappa_3$	ω_{d1}	ω_{d2}	ω_{d3}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\frac{d\mathcal{Q}_2}{dt} = 0$	1		3		3	1	3	1				3		1
	6		5		5	6	5	6		10		5	10	6
	8	+	7	+	7	8	7	8	+	13	+	7	13	8
	14		12		12	14	12	14				12		14
$\frac{d\mathcal{Q}_2}{dt} \neq 0$	1		3		3	1	3	1				+	+	+
	6	+	5	+	5	6	5	6	+	+	+	+	+	+
	8		7		7	8	7	8						

С целью изучения сходимости оценок идентифицируемых параметров и выбора оптимального состава вектора состояния проведено аналитическое исследование точности оценивания параметров АСК путем анализа решения ковариационного дифференциального уравнения следующего вида:

$$\dot{P}(t) = -P(t)H^T(A, \Omega, t)R^{-1}H(A, \Omega, t)P(t). \quad (4)$$

Выражения для невязок δI_1 , δI_3 действительных и модельных значений сигналов в каналах горизонтального приведения гиросплатформы модели измерений АСК (3) идентичны. Поэтому без потери общности удалось получить аналитическое решение уравнения (4) для первого канала горизонтального при-

ведения как при раздельном учете начальной ошибки азимутального ориентирования ψ_0 и скорости ее изменения ψ_1 , так и при их интегрированном учете в составе одной компоненты ψ , вектора состояния АСК. С целью выбора оптимального состава оцениваемых параметров проведен анализ точности АСК для векторов состояний $\bar{X}[3] = (\omega_1 \ \psi \ \delta\kappa_1)^T$ и $\bar{X}[4] = (\omega_1 \ \psi_0 \ \delta\kappa_1 \ \psi_1)^T$.

В качестве безразмерных параметров, характеризующих точность, были приняты отношения текущих дисперсий ошибок оценивания соответствующих компонент вектора состояния к их начальным значениям $\nu_i^{(j)}(t) = P_{ii}(t)/P_{ii}(0)$, где i – номер компоненты; j – размерность вектора состояния. Решение дифференциального уравнения позволило получить аналитические выражения для относительных ошибок, справедливые для моментов времени, соответствующих целому числу оборотов гиросплатформы:

$$\nu_i^{(4)}(t) = m_i(t) \cdot \nu_i^{(3)}(t); \quad \nu_i^{(3)}(t) = \frac{1}{1 + \varepsilon_i l_{ii}(t)}; \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (5)$$

Здесь $l_{ii}(t)$ – диагональный элемент матрицы $L = \int_0^t (H^T H) d\tau$, имеющих вид возрастающей со временем функции; ε_i – положительный коэффициент, характеризующий отношение начальной ошибки оценивания i -компоненты вектора состояния к интенсивности измерительного шума $P_{ii}(0)/R$.

Анализ выражений (5) показывает, что ошибка оценивания компонент вектора состояния $\bar{X}[3]$ уменьшается и связана с соответствующими ошибками оценивания компонент вектора состояния $\bar{X}[4]$ через зависящие от времени коэффициенты $m_i(t)$.

С целью подтверждения правильности полученных результатов произведено численное решение уравнения (4). Значения коэффициентов m_i в зависимости от числа оборотов гиросплатформы представлены в таблице 2.

Результаты численного и аналитического (5) решений уравнения (4), представленные на рис. 3, оказались близки и показали, что включение в вектор состояния скорости изменения азимутальной ошибки ψ_1 в виде отдельной компоненты приводит к существенно меньшей точности оценивания начальной

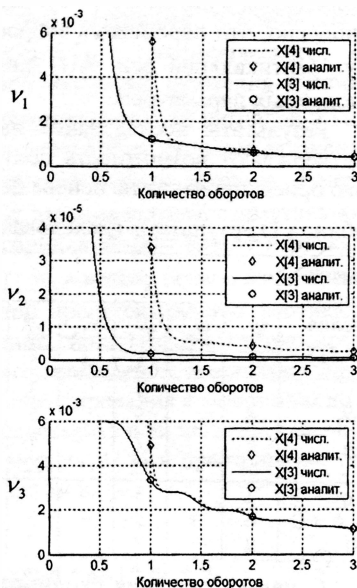


Рис. 3. Результаты численного и аналитического решений ковариационного уравнения

ошибки азимутального ориентирования ψ_0 гиросплатформы. Величина коэффициента m_2 в таблице 2 показывает, во сколько раз ухудшится точность в этом случае. В связи с этим предлагается учитывать указанные ошибки интегрировано в составе одной компоненты ψ_y вектора состояний АСК.

Таблица 2. Рассчитанные значения коэффициентов m_i

Количество оборотов гиросплатформы	Вычисленные значения коэффициентов m_i		
	m_1	m_2	m_3
1	4,66	19,08	1,46
2	1,20	4,80	1,03
3	1,08	4,31	1,01

Кроме того, из вида уравнений (3) следует, что измерительные каналы АСК связаны между собой только по ошибке азимутального ориентирования ψ_y . Однако поскольку линейные комбинации ψ_y и $(\psi_y + \gamma_{13})$ разрешимы, то с целью сокращения размерности проведена декомпозиция задачи оценивания в АСК: $\bar{X}_1 = (\omega_1 \ \psi_y \ \delta\kappa_1)^T$, $\bar{X}_3 = (\omega_1 \ \psi_y^{\gamma_{13}} \ \delta\kappa_3)^T$, где $\psi_y^{\gamma_{13}} = \psi_y + \gamma_{13}$.

В третьей главе обоснована целесообразность организации двухступенчатой схемы обработки информации, предложен алгоритм предварительной обработки информации с линейной моделью изменения сигнала и синтезированы алгоритмы идентификации и настройки параметров в АСК.

В ТГС ИСО медленно меняющаяся информация в каналах горизонтального приведения гиросплатформы снимается с частотой в десятки Гц. Поэтому основное время в такте идентификации T_u АСК приходится на период набора измерительной информации T_0 .

Накопленную измерительную информацию целесообразно подвергать процедурам сглаживания и экстраполяции (рис. 4). Сглаживание проводится с целью минимизации влияния шумов измерений, а необходимость прогноза (T_3) измеренных значений сигналов на конец такта идентификации обусловлена конечным временем выполнения вычислений по алгоритмам работы адаптивной системы коррекции ИСО.

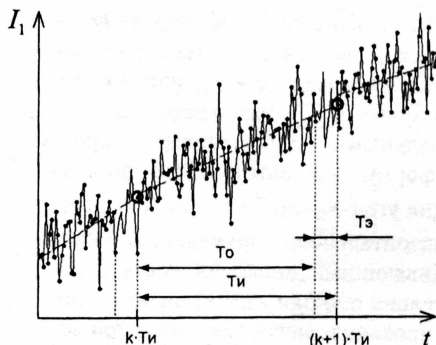


Рис. 4. Работа алгоритма предварительной обработки информации в АСК

Алгоритмы идентификации параметров синтезированной математической модели АСК (4) реализуются с применением метода наименьших квадратов после этапа предварительной обработки измерительной информации. Далее в соответствии с имеющимися на данный момент времени оценками вектора состояния АСК, осуществляется изменение параметров настраиваемых моделей.

Очевидно, что с целью недопущения снижения точности работы АСК обновление параметров настраиваемых моделей нецелесообразно на тех участках траектории движения гиросплатформы ТГС, где они плохо наблюдаемы. Кроме того, необходимо учитывать наличие двух измерительных каналов в АСК, между которыми, с целью повышения точности и сходимости оценок идентифицируемых параметров системы, можно организовать обмен информацией по ошибке азимутального ориентирования гиросплатформы ТГС.

Синтез алгоритмов настройки параметров АСК выполнен с учетом указанной взаимосвязи измерительных каналов и с использованием результатов исследования условий наблюдаемости параметров АСК. На основе теории ошибок систем автономного азимутального ориентирования трехосных гиростабилизаторов по методу нескольких измерительных положений траектория движения гиросплатформы вокруг вертикальной оси разбита на участки, на которых целесообразно определять ошибку азимутального ориентирования по информации только с первого канала (I), только с третьего канала (III) или с обоих каналов системы горизонтального приведения гиросплатформы одновременно.

По результатам решения дисперсионного уравнения ошибки азимутального ориентирования гиросплатформы, составленного для границ перечисленных участков, определен размер сектора $\pm 30^\circ$ относительно горизонтальных осей географической системы координат, в пределах которого целесообразно производить оценку ошибки азимутального ориентирования по измерениям только одного из каналов системы горизонтального приведения.

На рис. 5 показано разбиение траектории движения гиросплатформы на три области. При непрерывном вращении гиросплатформы измерительные каналы АСК будут находиться в первой и третьей области, чередуясь между собой, или во второй области. Установлено, что оптимальными положениями гиросплатформы для автономного определения угла γ_{13} по сигналам в каналах горизонтального приведения, обеспечивающими инвариантность относительно ошибки азимутального ориентирования, являются такие, при которых азимутальный угол принимает значения, кратные 45° .

Области оценивания и идентификации каждого параметра вектора состояния АСК и порядок использования информации с измерительных каналов приведены в таблице 3, а функциональные схемы синтезированных алгоритмов работы АСК показаны на рис. 6, 7 и 8.

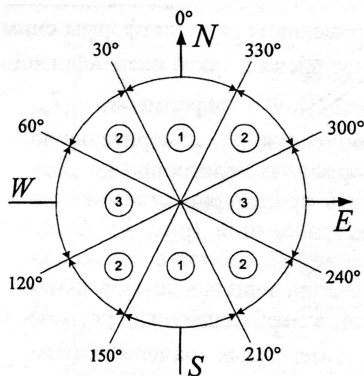


Рис. 5. Разбиение траектории движения гиросплатформы на области

Таблица 3. Оценивание и идентификация параметров АСК по областям траектории движения гироскопической платформы

Параметр	Использование измерительной информации каналов АСК			Отношение области идентификации параметра к траектории гироскопической платформы
	Первый канал (I)	Третий канал (III)	Два канала (I и III)	
ψ_y	60°...120°, 240°...300°	60°...120°, 240°...300°	30°...60°, 120°...150°, 210°...240°, 300°...330°	100 %
γ_{13}	—	—		33,3 %
$\delta\kappa_1$	330°...30°, 150°...210°	—		66,7 %
$\delta\kappa_3$	—	330°...30°, 150°...210°		66,7 %
ω_1	60°...120°, 150°...210°, 240°...300°, 330°...30°	—		100 %
ω_3	—	60°...120°, 150°...210°, 240°...300°, 330°...30°		100 %

Когда в первой области находится I измерительный канал, а в третьей области – III, работа АСК осуществляется согласно функциональной схеме, показанной на рис. 6.

Если измерительные каналы находятся в тех же областях, но меняются местами, то АСК работает по схеме, показанной на рис. 7.

Если оба измерительных канала находятся во второй области, АСК работает по схеме, представленной на рис. 8.

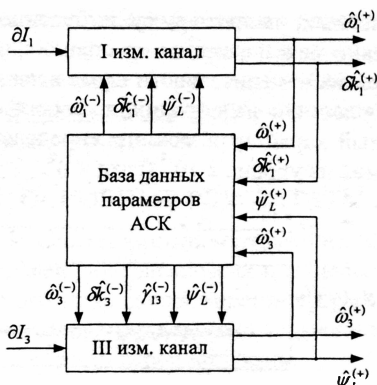


Рис. 6. Функциональная схема АСК (в первой области I канал)

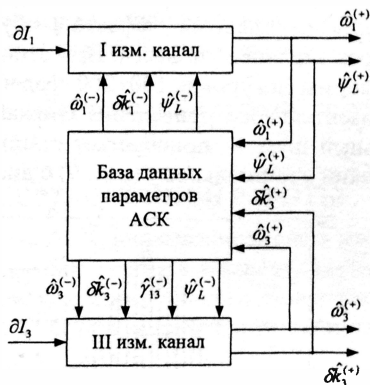


Рис. 7. Функциональная схема АСК (в первой области III канал)

Таким образом, с использованием синтезированных алгоритмов настройки реализуются замкнутые схемы оценивания и идентификации параметров системы с обменом информацией между измерительными каналами.

Данные схемы обеспечивают оптимальное непрерывное прецизионное оценивание ошибки азимутального ориентирования на всей траектории движения гиросплатформы и высокую степень идентификации инструментальных погрешностей ТГС с существенным сокращением размерности задач оценивания и идентификации параметров АСК.

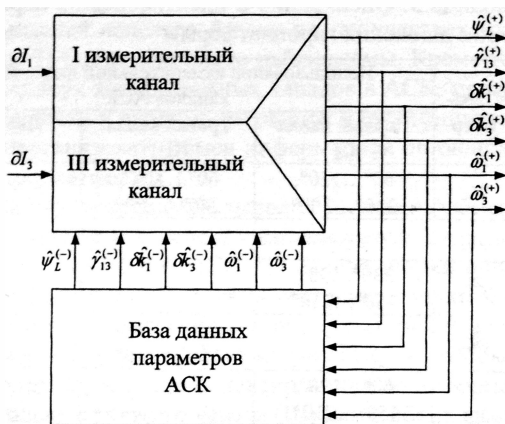


Рис. 8. Функциональная схема АСК (I и III каналы во второй области)

В четвертой главе представлены результаты исследования характеристик экспериментально зарегистрированных сигналов в каналах горизонтального приведения прибора-прототипа ИСО и моделирования алгоритмов работы АСК. В процессе эксперимента задавались развороты по наружной оси карданова подвеса ТГС, которая располагалась вертикально и находилась в режиме стабилизации, а две другие оси оставались горизонтальными и находились в режиме точного приведения в плоскость горизонта.

Установлено, что при скорости вращения гиросплатформы порядка градуса в секунду шумы измерений имеют нестационарный характер из-за влияния различных нелинейных эффектов, обусловленных, например, сухим трением в опорах карданова подвеса. При относительно малой скорости вращения гиросплатформы (на уровне $100 \div 200$ град $\cdot$ ч $^{-1}$) уровень измерительного шума в каналах горизонтального приведения снижается более чем на порядок, а сам измерительный шум w приобретает стационарный характер и закон распределения, близкий к нормальному (рис. 9) с дисперсией на уровне $2 \cdot 10^{-5}$ (град $\cdot$ ч $^{-1}$) 2 .

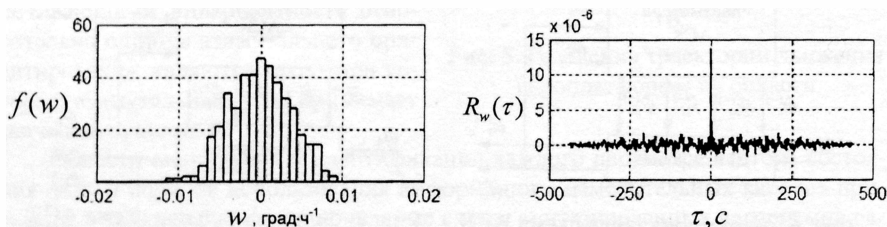


Рис. 9. Статистические характеристики измерительного шума

С использованием результатов исследования характеристик экспериментально зарегистрированных сигналов в каналах горизонтального приведения гиросплатформы ТГС проведено моделирование алгоритмов работы АСК в пакете Matlab. Начальные дисперсии оцениваемых ошибок обобщенных дрейфов задавались на уровне $5 \cdot 10^{-3}$ (град $\cdot$ ч $^{-1}$) 2 , углов ориентации гиросплатформы и перекосов входных осей датчиков – $2 \cdot 10^{-3}$ (град) 2 , относительных ошибок в каналах горизонтального приведения – $1 \cdot 10^{-8}$.

На рис. 10 показаны относительные ошибки оценивания компонент вектора состояния АСК при угловой скорости вращения гиросплатформы 120 град $\cdot$ ч $^{-1}$. Ошибка азимутального ориентирования гиросплатформы и инструментальные погрешности трехосного гиросtabilизатора в процессе применения алгоритмов АСК уменьшаются соответственно в десятки и сотни раз за один оборот гиросплатформы.

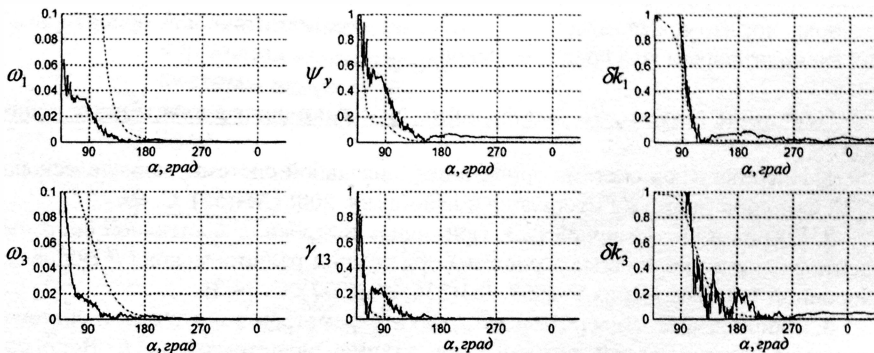


Рис. 10. Результаты моделирования алгоритмов работы АСК

Результаты моделирования алгоритмов работы АСК подтвердили сходимость ошибки азимутального ориентирования и инструментальных погрешностей ТГС при продолжительном непрерывном вращении гиросплатформы ИСО радиотелескопа вокруг вертикальной оси.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Синтезирована математическая модель АСК, описывающая связь между невязками действительных и модельных значений сигналов в каналах горизонтального приведения гиросплатформы с ошибкой азимутального ориентирования и инструментальными погрешностями ТГС при непрерывном азимутальном вращении гиросплатформы.

2. Изучена и подтверждена наблюдаемость ошибок ориентирования гиросплатформы и инструментальных погрешностей ТГС при постоянной и переменной угловых скоростях вращения гиросплатформы вокруг вертикальной оси.

3. Теоретически исследованы ошибки оценивания параметров АСК, определен рациональный состав вектора состояния и осуществлена декомпозиция задачи оценивания на основе полученных аналитических зависимостей, описывающих сходимость относительных ошибок оценивания параметров АСК с интегрированным и раздельным учетом скорости изменения ошибки азимутального ориентирования гиросплатформы.

4. Разработаны алгоритмы идентификации и настройки параметров АСК с обменом информацией об ошибке азимутального ориентирования гиросплатформы между измерительными каналами, а также обоснована целесообразность организации двухступенчатой схемы обработки информации в АСК.

5. Проверена работоспособность синтезированных алгоритмов путем математического моделирования алгоритмов работы АСК при постоянной скорости вращения гиросплатформы с использованием характеристик экспериментально зарегистрированных сигналов в каналах горизонтального приведения, и установлено, что применение АСК позволяет повысить точность ориентирования гиросплатформы ИСО радиотелескопа.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Инерциальная система ориентации зеркальной системы радиотелескопа / С.В. Смирнов [и др.] // Гироскопия и навигация. 2006. №4(55). С. 89.

2. Егоров Ю.Г., Смирнов С.В. Принципы построения адаптивной системы идентификации инерциальной системы ориентации радиотелескопа // Вопросы оборонной техники. Серия 9. 2009. №1(236)-№2(237). С. 34-36.

3. Смирнов С.В. Алгоритмы настройки параметров в адаптивной системе коррекции инерциальной системы ориентации радиотелескопа // Вопросы оборонной техники. Серия 9. 2011. №3(248)-№4(249). С. 29-32.

4. Егоров Ю.Г., Смирнов С.В. Наблюдаемость ошибки азимутального ориентирования и инструментальных погрешностей трехосного гиросtabilизатора по измерениям токов в каналах горизонтального приведения с вращением гиросплатформы в азимуте // XIV Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб., 2007. С. 62-64.

5. Егоров Ю.Г., Смирнов С.В. Идентификация параметров инерциальной системы ориентации радиотелескопа // XV Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб., 2008. С. 90-91.

6. Егоров Ю.Г., Смирнов С.В. Обработка информации в адаптивной системе коррекции инерциальной системы ориентации радиотелескопа // XVI Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб., 2009. С. 101-102.

7. Егоров Ю.Г., Смирнов С.В. Синтез алгоритмов настройки параметров в адаптивной системе коррекции инерциальной системы ориентации радиотелескопа // XVII Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб., 2010. С. 123-124.